

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 4028525 A1**

⑳ Aktenzeichen: P 40 28 525.1
㉑ Anmeldetag: 7. 9. 90
㉒ Offenlegungstag: 21. 3. 91

㉓ Int. Cl. 5:
H05H 1/46
H 05 H 1/28
H 05 H 1/30
H 05 H 1/42
// F03H 1/00,
H01L 21/302

DE 4028525 A1

㉔ Unionspriorität: ㉕ ㉖ ㉗
08.09.89 JP 1-231741

㉘ Anmelder:
Hitachi, Ltd., Tokio/Tokyo, JP

㉙ Vertreter:
Pagenberg, J., Dr.jur.; Frohwitter, B., Dipl.-Ing.,
Rechtsanwälte; Geißler, B., Dipl.-Phys.Dr.jur., Pat.-
u. Rechtsanwalt; Bardehle, H., Dipl.-Ing.; Dost, W.,
Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Altenburg, U., Dipl.-Phys.,
Pat.-Anwälte, 8000 München

㉚ Erfinder:
Okamoto, Yukio, Sagamihara, Kanagawa, JP

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉛ Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung

Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung mit einer Kombination eines ebenen Wellenleiters und eines zylindrischen koaxialen Wellenleiters. Mikrowellenleistung wird einem Körper eines Entladeplasmas effizient zugeführt, das im Inneren einer Entladeröhre erzeugt wird, die entlang der Mittenachse eines inneren Leiters des zylindrischen koaxialen Wellenleiters angeordnet ist. Der ebene Wellenleiter hat ein offenes Ende, über das Mikrowellenleistung eingeführt wird und eine Endplatte, die gegenüber dem offenen Ende angeordnet ist. Die Mittenachse des zylindrischen koaxialen Wellenleiters ist um ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung entfernt von der Endplatte des ebenen Wellenleiters in Richtung auf dessen offenes Ende angeordnet. Der innere und der äußere Leiter des zylindrischen koaxialen Wellenleiters sind mit der unteren bzw. der oberen Wand des ebenen Wellenleiters gekoppelt. Diese Anordnung ermöglicht, daß der zylindrische koaxiale Wellenleiter als effizienter Modustransformer funktioniert, der auf das elektromagnetische Mikrowellenfeld wirkt bzw. gerichtet ist, das in dem ebenen Wellenleiter ausgebildet ist. Dies wiederum ermöglicht, daß Mikrowellenplasma von hoher Leistung und mit hoher Effizienz erzeugt wird.

DE 4028525 A1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Plasmaquellenvorrichtung, die Mikrowellenleistung verwendet, und betrifft insbesondere eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung, die in der Lage ist, ein Plasma hoher Temperatur und hoher Dichte mit hoher Effizienz und Stabilität zur Verwendung bei der Spurenelement-Spektrometrie mit Plasmaquellen, Plasmastrahlen und Plasmaverarbeitung zu erzeugen.

Eine herkömmliche Plasmaquellenvorrichtung, die Mikrowellenleistung verwendet, ist erläuternd z. B. in "Spectrochimica Acta (Band 37B, Nr. 7, Seiten 583—592, 1982)" beschrieben.

Die Fig. 6A und 6B zeigten die in der genannten Veröffentlichung beschriebene Mikrowellen-Plasmaquellen-Einrichtung mit dem Namen Surfatron. Bei dieser Vorrichtung wird Mikrowellenleistung über ein koaxiales Verbindungselement 1 geliefert, das mit einem Koaxialkabel verbunden ist. Die gelieferte Mikrowellenleistung geht durch eine Koaxialleitung, bevor sie in einen Hohlraum 6 über einen Mikrowellenkoppler 2 eingeführt wird. Der Hohlraum 6 ist von einer Quarz-Entladeröhre 7 durchdrungen. An einem axialen Ende des Hohlraums 6 ist eine Metallplatte 4. Die axiale Länge des Hohlraums 6 wird durch ein Hohlraumlängen-Einstellsystem 5 eingestellt. Eine Spaltlänge "g" wird durch ein Spalt-Einstellsystem 3 eingestellt. Über einen Luft-einführanschluß 9 wird Kühlluft bzw. Kühlgas in den Hohlraum 6 eingeführt.

Bei dieser Vorrichtung wird eine Probe mit einem Trägergas zur Verwendung als eine Gasprobe gemischt. Die Gasprobe wird mit einem Plasmagas zum Einführen in die Entladeröhre 7 über einen Gaseinführanschluß 8 gemischt. Das derart eingeführte Plasmagas wird durch die in den Hohlraum 6 eingeführte Mikrowellenleistung angeregt, wodurch innerhalb der Entladeröhre 7 ein Plasma erzeugt wird. In diesem Plasma wird die Probe angeregt und dann ionisiert.

Ein Nachteil dieser Vorrichtung gemäß dem Stand der Technik ist der, daß die Analyse von wäßrigen Proben nicht in Betracht gezogen wird. Die Tatsache, daß die Vorrichtung nur Gasproben zur Analyse annimmt, beschränkt die Art der zu analysierenden Proben.

Ein weiterer Nachteil dieser bekannten Vorrichtung sind seine geringen Pegel bei der Probeneinführeffizienz und Ionisierungseffizienz. Ein weiterer Nachteil ist der, daß die Vorrichtung keine adäquate Sicherung gegen Streuung (bzw. Fehlerstellen) bzw. ein Ausströmen von Mikrowellenleistung liefert. Ein weiterer Nachteil ist, daß die Stabilität der Plasmaerzeugung mit dieser Vorrichtung nicht hinreichend groß ist.

Wie es in Fig. 6A gezeigt ist, versorgt die bekannte Vorrichtung den Hohlraum 6 mit Mikrowellenleistung zur Plasmaerzeugung über das Koaxialkabel und den Koppler 2. Diese Anordnung beschränkt den Pegel der Plasmaleistung, die zugeführt werden kann, auf ein Maximum von etwa 0,5 kW. Somit ist die Vorrichtung nicht in der Lage, ein heißes und hochdichtes Plasma zu erzeugen, das direkt wäßrige Proben anregt und ionisiert. Dies bedeutet, daß eine direkte Analyse von wäßrigen Proben mit der bekannten Vorrichtung unmöglich ist. Andere Nachteile sind ein ansehnlicher Leistungsverlust über das Koaxialkabel, komplizierte Strukturen von solchen Komponenten wie dem Koppler 2 und die aufwendigen Einstellungen, die für diese Teile erforderlich sind. Da die Plasmaquellenvorrichtung mit dem bekannten Aufbau niedrige Pegel hinsichtlich der Effizienz bei

der Ausnutzung von Mikrowellenleistung hat, lassen sich mit der Vorrichtung, wenn diese als Ionisierer für Analyseproben verwendet wird, nicht hinreichend hohe Pegel der Empfindlichkeit aufgrund ihrer geringen Pegel bei der Ionisierungseffizienz bilden.

Das Ausströmen von Mikrowellenleistung aus Öffnungen, wie einem Fenster der Metallplatte 4 an einem Ende des Hohlraums 6, läßt das S/N-Verhältnis von Signalen leicht schlechter werden, die zur Probenanalyse erfaßt werden. Dieses Ausströmen kann auch das Stören von Radiowellen verursachen. Die zum Kühlen der Entladeröhre 7 und anderer betroffener Teile eingeführte Luft fließt von dem Fenster der Metallplatte 4 in Richtung auf die Spitze der Entladeröhre 7. Der Luftfluß destabilisiert den Zustand des von der Spitze der Entladeröhre 7 freigegebenen Plasmas.

Dies macht es unmöglich, eine hohe Sensibilität und Stabilität beim Ausführen von Emissionsanalysen unter Verwendung der Emission von Proben oder beim Ausführen von Massanalysen unter Verwendung von Probenionisierung zu gewährleisten.

Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die eine hinreichend große Mikrowellenleistung in einen Plasmaerzeugungsraum einführt, um ein Plasma mit ausreichend hohen Pegeln bezüglich der Temperatur und Dichte zu erzeugen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die direkt eine wäßrige Probe in das erzeugte Plasma einführt, um die Probe zur direkten Analyse anzuregen und zu ionisieren.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die Sicherheitsmaßnahmen hat, zum Verhindern, daß Mikrowellen aus der Vorrichtung ausströmen.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die ein Kühlsystem hat, mit dem effizient eine Plasmaerzeugungs-Entladeröhre, innere Wände der Vorrichtung und andere Teile im Inneren gekühlt werden können.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die verhindert, daß der Fluß eines Kühlgases zum Kühlen der Entladeröhre oder anderer betroffener Teile die Stabilität des erzeugten Plasmas stört, wodurch eine stabile Erzeugung und Aufrechterhaltung von Plasma gewährleistet werden.

Um die genannten Aufgaben der Erfindung zu lösen, wird gemäß einem ersten Aspekt eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung geschaffen, die aufweist: Die Kombination eines ebenen Wellenleiters mit einem zylindrischen koaxialen Wellenleiter, als eine Einrichtung zum Zuführen von Mikrowellenleistung in den Plasmaerzeugungsraum. Das heißt, die gesamte Route der Mikrowellenleistungszufuhr wird durch eine Wellenleiteranordnung gebildet. Der ebene Wellenleiter hat ein offenes Ende, durch das Mikrowellenleistung von außen in die Vorrichtung eingeführt werden kann. Axial dem offenen Ende gegenüberliegend ist eine Endplatte des ebenen Wellenleiters. Die zwei Wellenleiter sind miteinander derart gekoppelt, daß die mittlere Achse des zylindrischen koaxialen Wellenleiters um ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung von der Endplatte des planaren bzw. ebenen Wellenleiters entfernt positioniert ist, wobei der zylindrische koaxiale Wellenleiter auf das elektrische Mikrowellenfeld gerichtet ist, das innerhalb des ebenen Wellenleiters gebil-

det ist. Insbesondere ist das obere Ende eines inneren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters mit der Umfangskante eines kreisförmigen Loches gekoppelt, das an einer Bodenwand des ebenen Wellenleiters vorgesehen ist, wobei das obere Ende des inneren Leiters offen gelassen ist. Das untere Ende des äußeren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters ist mit der Umfangskante eines kreisförmigen Loches gekoppelt, das an einer oberen Wand des ebenen Wellenleiters vorgesehen ist, wobei das untere Ende des äußeren Leiters durch eine leitende Endplatte kurzgeschlossen ist. Eine aus isolierendem Material hergestellte Entladeröhre ist entlang der Mittenachse des inneren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters vorgesehen. Das obere Ende der Entladeröhre steht aus einem Durchgangsloch im Mittelpunkt der leitenden Endplatte ab, wobei die Spitze des oberen Endes der Röhre offen gelassen ist. Das untere Ende der Entladeröhre ist mit einem Plasmagas-Einführungssystem und einem Probeneinführungssystem verbunden.

Der zylindrische coaxiale Wellenleiter des zuvor erwähnten Aufbaus wirkt als effizienter Modustransformator bzw. -umwandler. Da die gesamte Route für die Mikrowellenleistungseinführung in die Entladeröhre durch die Wellenleiteranordnung gebildet ist, können Mikrowellen mit großer Leistung effizient in einen Plasmakörper eingeführt werden. Dies ermöglicht es, ein Plasma mit hinreichend hohen Temperatur- und Dichtepiegeln zu erzeugen, um eine direkte Analyse von wäßrigen Proben auszuführen.

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung geschaffen mit einem Kühlgas-Einführungssystem, das ein Kühlgas in das untere Ende der Entladeröhre einführt. Das Kühlgas fließt nach oben entlang der äußeren Fläche der Entladeröhre zu deren Kühlung. Da diese Anordnung die Entladeröhre effizient kühlt, verbleibt das Plasma im Inneren der Röhre stabil, wodurch die Lebensdauer der Vorrichtung hinsichtlich des Wärmewiderstandes verlängert wird. Das Kühlgas wird nach dem Durchgang durch den Kühlprozeß nach außen über eine Vielzahl von Entladeanschlüssen abgegeben, die an einer Umfangswand des äußeren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters vorgesehen sind. Bei dieser Anordnung fließt das entladene Kühlgas senkrecht zur Achse des zylindrischen coaxialen Wellenleiters und trifft die Spitze der Entladeröhre nicht direkt. Somit wird die Stabilität des von der Entladeröhre freigegebenen Plasmas nicht gestört.

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird eine Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung geschaffen, die ein Mikrowellenausströmungs-Einstellsystem unter der Bodenfläche des inneren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters hat. Dieses System wird verwendet, um zu gewährleisten, daß der Abstand zwischen dem offenen Ende des inneren Leiters und der Bodenkante eines Leiters, der das untere Ende der Entladeröhre umgibt, zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung beträgt. Das heißt, das System gewährleistet, daß die Bodenkante des Leiters mit einem Knoten der stehenden Welle der verwendeten Mikrowellen übereinstimmt. Diese Anordnung verhindert das Ausströmen von Mikrowellenleistung über den inneren Raum des Leiters, der das untere Ende der Entladeröhre umgibt. Dies wiederum macht es möglich, eine Plasmaquellenvorrichtung zu schaffen, die sicher und hocheffizient ist bei einem Minimum von Leistungsverlusten und ohne Störfehlfunktionen.

Weitere Vorteile, Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der Beschreibung in Verbindung mit der Zeichnung.

Fig. 1A und 1B sind eine Draufsicht bzw. eine Querschnittsansicht einer Ausführungsform einer Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2A und 2B sind Querschnittsansichten eines repräsentativen äußeren Leiters eines zylindrischen coaxialen Wellenleiters, der in der Ausführungsform nach Fig. 1B verwendet wird;

Fig. 3 ist eine Teilschnittansicht, die Schlüsselteile einer Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung darstellt;

Fig. 4A, 4B und 4C sind Querschnitte von repräsentativen Entladeröhren, die in den Ausführungsformen verwendet werden;

Fig. 5 ist eine Querschnittsansicht eines typischen Spitzenteils einer Entladeröhre, die in den Ausführungsformen verwendet wird; und

Fig. 6A und 6B sind eine Querschnittsansicht bzw. eine Seitenansicht einer typischen bekannten Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung.

Die Fig. 1A und 1B sind eine Draufsicht bzw. eine Querschnittsansicht einer Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Diese Ausführungsform arbeitet geeignet als Plasmaquellenvorrichtung zur Elementenanalyse.

In den Fig. 1A und 1B ist ein ebener Wellenleiter 10 aus einem leitenden Material wie Kupfer gebildet. Wenn die Frequenz der verwendeten Mikrowellenleistung, 2,45 GHz beträgt, mißt das Innere des Wellenleiters beispielsweise 8,4 mm (Dimension "a") × 109,2 mm (Dimension "b") × 87 mm (Dimension "c"). Die Mikrowellenleistung wird über ein offenes Ende 11 des ebenen Wellenleiters 10 eingeführt. Gegenüber dem offenen Ende 11 ist eine Endplatte 12. In einer Entfernung "d", die einem Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung entspricht, und zwar entfernt von der Endplatte 12, liegt die Mittenachse eines zylindrischen coaxialen Wellenleiters, der durch einen zylindrischen inneren Leiter 20 und einen zylindrischen äußeren Leiter 50 gebildet ist. Der zylindrische coaxiale Wellenleiter ist mit dem ebenen Wellenleiter derart gekoppelt, daß die Mittenachse des zylindrischen coaxialen Wellenleiters in Richtung des elektrischen Mikrowellenfeldes liegt.

Insbesondere ist der zylindrische innere Leiter 20, der einen Teil des zylindrischen coaxialen Wellenleiters bildet, illustrativ aus einem leitenden Material wie Kupfer hergestellt und hat einen Querschnitt, wie er in Fig. 1B gezeigt ist. Im Inneren des inneren Leiters 20 ist ein zylindrischer Hohlraum 21. Das untere Ende des inneren Leiters 20 läuft durch ein kreisförmiges Loch 14 an einer Bodenwand 13 des ebenen Wellenleiters und ist mit der Wand 13 gekoppelt. Das obere Ende des inneren Leiters 14 ist offen gelassen. Der zylindrische äußere Leiter 50 ist auf ähnliche Weise aus einem leitenden Material wie Kupfer hergestellt. Das untere Ende des äußeren Leiters 50 ist mit einer oberen Wand 15 des äußeren Umfangs eines kreisförmigen Loches 16 des ebenen Wellenleiters 10 gekoppelt. Das obere Ende des äußeren Leiters 50 ist durch eine Endplatte 60 in einer Entfernung (typischerweise 1–20 mm) über dem offenen Ende des inneren Leiters 20 kurzgeschlossen, wobei die Endplatte aus einem leitenden Material wie Kupfer besteht.

Wenn der innere Leiter 20 und der äußere Leiter 50, wie beschrieben, mit dem ebenen Wellenleiter 10 gekoppelt sind, wirkt der zylindrische koaxiale Wellenleiter, der durch die zwei Leiter gebildet ist, als ein Modustransformer bzw. -umwandler, der die eingeführte Mikrowellenleistung in den ebenen Wellenleiter 10 adressiert bzw. schickt. Eine Entladeröhre 80 aus einem elektrisch isolierenden Material wie Quarz oder Keramik durchdringt konzentrisch den inneren Leiter 20 des zylindrischen koaxialen Wellenleiters. Das untere Ende der Entladeröhre 80 steht nach unten von dem unteren Ende des inneren Leiters 20 vor. Das obere Ende der Entladeröhre 80 läuft durch das offene Ende 22 des inneren Leiters 20 und steht nach oben aus einem Durchgangsloch 62 an der Endplatte 60 des äußeren Leiters 50 vor. Die Endplatte 60 hat an einem Umfang 61 des Durchgangslochs 62 eine Dicke, die konzentrisch zu dem Loch 62 ist und geringer als die Dicke von dessen äußerem Abschnitt ist.

Unter dem inneren Leiter 20 ist ein Mikrowellenausström-Einstellsystem 30 zum Verhindern des Ausströmens von Mikrowellen. Das System 30 hat prinzipiell einen Zylinder, der aus einem leitenden Material wie Kupfer hergestellt ist. Im Inneren des Zylinders ist ein zylindrischer Raum, der das untere Ende der Entladeröhre 80 umgibt.

Unter dem Mikrowellenausström-Einstellsystem 30 ist ein Kühlgas-Einführsystem 40 zum Kühlen der Entladeröhre 80, des inneren Leiters 20 und anderer Teile. Das System hat prinzipiell ein kappenartiges Element, das aus einem leitenden Material wie Kupfer besteht. Ein Kühlgas (z. B. Luft) wird über ein Einführungsrohr 41 in das Kühlgas-Einführsystem 40 in tangentialer Richtung von diesem eingeführt.

Das so eingeführte Kühlgas fließt spiralförmig über die Oberfläche der Entladeröhre 80. Das Kühlgas passiert einen internen Raum 21 des inneren Leiters 20 und geht in den zylindrischen Raum im Inneren des äußeren Leiters 50 über dessen offenes Ende 22. Eventuell wird das Kühlgas nach außen über eine Vielzahl von Entladeanschlüssen 70 an der Umfangswand des äußeren Leiters 50 abgegeben (z. B. 16 Anschlüsse, die den Umfang gleichmäßig in 16 Teile teilen).

Die gezeigte Ausführungsform wirkt geeignet als Plasmaquellenvorrichtung zur Elementenanalyse. Aus diesem Grund besteht das untere Ende der Entladeröhre 80 aus einer zweifach konzentrischen Röhrenstruktur. Bei diesem Aufbau wird die zu analysierende Probe über das untere Ende einer inneren Röhre 81 eingeführt, während das Plasmagas (mit He, N₂, Ar, Luft, etc.) getrennt davon über einen Gaseinführanschluß 82 am unteren Ende einer äußeren Röhre eingeführt wird.

Mit dieser Ausführungsform sind das Mikrowellenausström-Einstellsystem 30 und das Kühlgas-Einführsystem 40 separat vorgesehen. Es ist anzumerken, daß die zwei Systeme alternativweise auch in ein System integriert sein können.

Bei dem oben beschriebenen Aufbau gemäß Fig. 1B ist die axiale Länge "e" des äußeren Leiters 50 (Abstand zwischen der Bodenfläche der Endplatte 60 und der oberen Fläche der Bodenwand 13) auf zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung eingestellt. Die Spatlänge zwischen dem offenen Ende 22 des inneren Leiters 20 und der Endplatte 60 ist so eingestellt, daß sie in einen Bereich zwischen 1 und 20 mm fällt. Die Abmessung "f" zwischen dem offenen Ende 22 des inneren Leiters 20 und einer unteren Kante 42 des Kühlgas-Einführsystems 40 ist auf zumindest ein

Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung eingestellt. Diese Anordnung veranlaßt, daß die Bodenfläche bzw. die untere Fläche der Endplatte 60 und die untere Kante des Kühlgas-Einführsystems 40 jeweils mit einem Bauch und einem Knoten der stehenden Welle der Mikrowellenleistung zusammenfallen. Dies wiederum ermöglicht, daß die Mikrowellenleistung über das offene Ende 11 des ebenen Wellenleiters 10 eingeführt wird, um effizient in das im Inneren der Entladeröhre 80 erzeugte Plasma absorbiert zu werden. Durch die eliminierte Reflexion von Mikrowellen und durch ausgeprägte Einsparungen hinsichtlich der Ausströmleistung kann ein Plasmakörper erzeugt und auf hohen Temperatur- und Konzentrationspegeln gehalten werden.

Bei der genannten Ausführungsform wird ein Wellenleiteraufbau (ebener Wellenleiter) verwendet, um Mikrowellenleistung einzuführen, und ein anderer Wellenleiteraufbau (zylindrischer koaxialer Wellenleiter) wird verwendet zur Modustransformation der eingeführten Mikrowellenleistung. Dieser Aufbau ermöglicht die Verwendung von hoher Mikrowellenleistung mit 0,5 kW oder höher zur Plasmaerzeugung. Dies wiederum ermöglicht, daß ein Plasma hoher Temperatur und hoher Dichte stabil erzeugt und aufrecht erhalten werden kann. Wäßrige Proben können mit diesem Aufbau hinreichend zur direkten Analyse mit hohen Empfindlichkeitspegeln angeregt werden.

Durch effizientes Kühlen der Entladeröhre 80 und anderer verwandter Teile trägt das Kühlgas-Einführsystem 40 auch zu dem stabilen Aufrechterhalten des erzeugten Plasmas bei und verlängert die Wärmewiderstands-Lebensdauer der Vorrichtung. Da das eingeführte Kühlgas radial aus dem äußeren Leiter 50 (d. h. kreuzweise) über die Entladeanschlüsse 70 ausgelassen wird, verbleibt das in der Entladeröhre 80 erzeugte Plasma von dem Fluß des abgegebenen Kühlgases ungestört. In einem stabil aufrechterhaltenen Zustand streut das Plasma axial nach oben und wird nach außen über die Spitzenöffnung der Entladeröhre 80 abgegeben. Dieses Merkmal ermöglicht, eine Emissionsspektrometrie und Massenspektrometrie stabil und mit hohen Empfindlichkeitspegeln durchzuführen.

Das Mikrowellenausström-Einstellsystem 30 ist vorgesehen, um zu gewährleisten, daß die axiale Länge "f" des Leiters, der die Entladeröhre unterhalb der Bodenwand des ebenen Wellenleiters (einschließlich des Kühlgas-Einführsystems 40) umgibt, zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung beträgt. Somit verringert das System 30 das Ausströmen von Mikrowellenleistung nach außen, wodurch ermöglicht wird, daß die Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung einen geringeren Leistungsverlust und keine Radiowellen-Störeeigenschaften hat.

Bei der genannten Ausführungsform kann das obere Ende des inneren Leiters 20 alternativweise mit schraubenförmigen leitenden Spulen bzw. Windungen gewickelt sein, wobei der innere Durchmesser der Windungen gleich dem des inneren Leiters 20 ist, wobei die Anzahl der Windungen 0,5 bis 5 beträgt. Das mit Spulen bzw. Windungen ausgestattete obere Ende kann mit der Endplatte 60 verbunden sein.

Fig. 2A zeigt eine weitere erläuternde äußere Leiteranordnung zur Verwendung mit der Ausführungsform gemäß den Fig. 1A und 1B. Eine axiale Länge "e₁" der äußeren Leiteranordnung ist derart ausgelegt, daß sie fein abgestimmt ist. Ein zylinderförmiger erster äußerer Leiter 50 ist mit einem kappenartigen zweiten äußeren

Leiter 51 bedeckt, der aus einem leitenden Material wie Kupfer besteht. Der zweite äußere Leiter 51 gleitet axial auf dem Umfang des ersten äußeren Leiters 50. Um die axiale Länge "e₁" für die gesamte äußere Leiteranordnung fein abzustimmen, verschiebt man den zweiten äußeren Leiter 51, bis eine vorbestimmte axiale Länge erreicht ist. Dann wird der zweite äußere Leiter 51 unter Verwendung von Einstellschrauben 52 fixiert. Die Endplatte 60, das Durchgangsloch 62 der Entladeröhre und die Kühlgas-Entladeanschlüsse 70 dieser äußeren Leiteranordnung liefern die gleichen Funktionen wie ihre Gegenstücke in Fig. 1B. Im Unterschied zur vorangegangenen Ausführungsform sind diese Teile auf der Seite des zweiten äußeren Leiters 51 installiert.

Fig. 2B zeigt eine weitere erläuternde äußere Leiteranordnung. Mit dieser Anordnung wird das Kühlgas, das über die Kühlgas-Abführanschlüsse 70 freigegeben wird, durch eine Ablenkplatte 63 abgelenkt, so daß das Gas das Plasma nicht durch Erreichen der Spitze der Entladeröhre 80 destabilisiert. Insbesondere wird der Fluß des Kühlgases, das seitlich über die Abführanschlüsse 70 abgegeben wird, durch die Ablenkplatte 63 nach unten abgelenkt. Dieser Aufbau eliminiert virtuell die Möglichkeit, daß das freigegebene Kühlgas das aus der Spitze der Entladeröhre 80 abgegebene Plasma destabilisiert. Dies macht es möglich, die Menge des eingeführten Kühlgases zu erhöhen, was eine größere Kühlkapazität ergibt.

Fig. 3 ist eine Teilschnittansicht einer Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung. Diese Ausführungsform funktioniert geeignet als Plasmaquellenvorrichtung, die Plasma-Jet- bzw. Plasmastrahl-Antriebsenergie für einen Raumflug als auch für Plasmaverarbeitung liefert (zur Dünnschichtbildung und zum Ätzen von Halbleitereinrichtungen). In dieser Ausführungsform ist der innere Druck der Entladeröhre 80 zur Plasmaerzeugung erniedrigt. Wie in Fig. 3 gezeigt ist, ist die Spitze der Entladeröhre 80 an einer Vakuumwand 121 einer Vakuumkammer 120 angebracht. Der innere Raum der Vakuumkammer 120 wird durch eine Vakuumpumpe 130 zur Druckreduktion evakuiert. Weiterhin kann eine nicht gezeigte Magnetfeld-Erzeugungseinrichtung außerhalb der Entladeröhre 80 vorgesehen sein, wobei die Einrichtung ein Magnetfeld anlegt, dessen Intensität die Elektronenzyklotron-Resonanzbedingung innerhalb der Röhre 80 hat. Es ist anzunehmen, daß die Vakuumkammer 120 und die Vakuumpumpe 130 nicht benötigt werden, wenn diese Ausführungsform als Plasmastrahl-Generator verwendet wird, der Plasmastrahl-Antriebsenergie zum Raumflug liefert.

Die Fig. 4A, 4B und 4C zeigen weitere repräsentative Entladeröhren, die in dieser Ausführungsform verwendet werden. In Fig. 4A ist eine Entladeröhre gezeigt, die zur Plasmaverarbeitung geeignet ist. Diese Entladeröhre ist ein Zylinder mit einem inneren Durchmesser von 2 mm bis 30 mm, auf eine geeignete Länge abgeschnitten, und aus Quarz oder Keramik hergestellt. Fig. 4B zeigt eine Entladeröhre, die zur Plasmastrahlerzeugung geeignet ist. Eine Düse 83 ist an der Spitze der Entladeröhre vorgesehen, wobei der innere Durchmesser der Düse in Richtung auf das Ende aufgeweitet ist. Fig. 4C zeigt eine Entladeröhre, die geeignet ist zur Spurenelementanalyse. Entlang der Mittelnachse des unteren Endes der Entladeröhre (äußere Röhre) 80 ist eine weitere Entladeröhre (innere Röhre) 81, die aus Quarz oder Keramik besteht. Die Anordnung bildet eine duale Entladeröhrenstruktur. Die innere Röhre 80 und die äußere

Röhre 81 sind durch Einrichtungen 84 feststehend gelagert. Um zu verhindern, daß das Plasmagas und die Probe über Spalte zwischen Einrichtungen 84 und den Entladeröhren 80 bzw. 81 austreten, sind Abdichtelemente 111 wie O-Ringe vorgesehen, wie es gezeigt ist.

Fig. 5 zeigt einen typischen Spitzenteil der Entladeröhre, die bei dieser Ausführungsform verwendet werden soll. Wenn die Ausführungsform der Erfindung verwendet wird, um Plasmastrahl-Antriebsenergie zu liefern, wird es notwendig, die Spitze der Entladeröhre 80 zu kühlen. Diese Anforderung wird durch die Kühlstrukturen der Entladeröhrenspitze gemäß Fig. 5 erfüllt. Wie gezeigt, umgibt ein Kühlelement bzw. Frosterselement 90, das aus einem isolierenden Material oder Metall gebildet ist, den Umfang der Spitze (Düse) 83 der Entladeröhre 80, und ein Kühlmittel (z. B. Wasser) fließt durch das Innere des Kühlelements 90. Ein thermisch leitendes Material 100 ist zwischen der Entladeröhre 80 und dem Kühlelement 90 derart angeordnet, daß Wärme effizient von der Röhre zu dem Kühlelement abgeleitet wird.

In Fällen, wenn der zuvor erwähnte ebene Wellenleiter in Anwendungen verwendet wird, die das Einführen von großen Mikrowellenleistungen involvieren, müssen die Bodenwand 13, die obere Wand 15 und die äußeren Wandabschnitte von hohen Temperaturen effizient abgekühlt werden. Dies wird erreicht, indem diese Wände mit (wärme-)abstrahlenden Rippen oder mit dem Wasserkühlsystem gemäß Fig. 5 ausgestattet werden, um den Temperaturanstieg der Wände zu minimieren.

Wie gezeigt und gemäß der Erfindung wird der zylindrische koaxiale Wellenleiter, der die Modustransformationsmöglichkeit hat, von der Endplatte des ebenen Wellenleiters um ein Viertel der verwendeten Wellenlänge weg verbunden. Dieser Aufbau ermöglicht, daß Mikrowellen großer Leistung effizient in das erzeugte Plasma absorbiert werden können, und zwar ohne reflektierte Mikrowellenleistung, wodurch ein stabiler Plasmakörper mit hoher Temperatur- und Konzentrationspegeln erzeugt wird. Dies wiederum führt zu Vorteilen, daß die Implementierung von empfindlicheren Analysegeräten, erhöhter Plasmastrahl-Antriebsenergie und vergrößertem Durchsatz bei der Plasmaverarbeitung möglich wird.

Erfindungsgemäß kühlt das Kühlgas-Einführsystem unter der Entladeröhre die Oberfläche der Entladeröhre als auch die innere Wandfläche des koaxialen Wellenleiters effizient. Die Anordnung ermöglicht, daß das im Inneren der Entladeröhre erzeugte Plasma axial auf stabile Weise von der Spitze der Röhre streuen bzw. diffundieren kann. Dieses Merkmal ermöglicht, eine Emissionsspektrometrie und eine Massenspektrometrie höherer Empfindlichkeit zu realisieren und eine größere Plasmastrahl-Antriebsenergie zu liefern.

Wie erwähnt, wird das Mikrowellenausström-Einstellsystem vorgesehen, um zu gewährleisten, daß die axiale Länge einschließlich des Kühlgas-Einführsystems zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung beträgt. Dieser Aufbau verursacht, daß das untere Ende des Kühlgas-Einführsystems mit einem Knoten der stehenden Welle der Mikrowellenleistung zusammenfällt. Hieraus ergibt sich der Vorteil, daß dies zu einer signifikanten Reduktion von Mikrowellenausströmung aus der Vorrichtung führt. Die verminderten Ausströmungen führen zu einer Plasmaquellenvorrichtung mit einem besseren S/N-Verhältnis und ohne Störeeigenschaften bzw. Störsendeeigenschaften bzw. mit vermindertem Risiko des Auftretens von Stör-

fallen.

Zusätzlich zu den zuvor erwähnten plasmaverwendenden Instrumenten und Vorrichtungen ist die Plasmaquellenvorrichtung gemäß der Erfindung geeignet für einen enormen Bereich von Anwendungen wie Ultraviolett-Vakuumstrahlenquellen, metastabile Atomstrahlquellen und Plasmaquellen hoher oder niedriger Spannung für verschiedene plasmabezogene Applikationen.

Obwohl die Erfindung in Verbindung mit bestimmten Ausführungsformen beschrieben worden ist, so ist die Erfindung doch so zu verstehen, daß viele Alternativen, Modifikationen und Variationen für den Fachmann aus der vorangegangenen Beschreibung ohne weiteres offensichtlich werden. Demgemäß ist auch beabsichtigt, daß die vorliegende Erfindung all diese Alternativen, Modifikationen und Variationen umfassen soll, soweit sie in den Schutzbereich der Ansprüche fallen.

Patentansprüche

1. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung mit:
einem ebenen Wellenleiter mit einem offenen Ende, durch das Mikrowellenleistung eingeführt wird, und einer Endplatte, die dem offenen Ende gegenüber angeordnet ist;
einem zylindrischen coaxialen Wellenleiter, dessen Mittenachse um ein Viertel der Wellenlänge der Mikrowellenleistung weg von der Endplatte des ebenen Wellenleiters angeordnet ist, wobei ein innerer und ein äußerer Leiter des zylindrischen coaxialen Wellenleiters mit einer unteren bzw. einer oberen Wand des ebenen Wellenleiters gekoppelt sind; und
einer Entladeröhre, die auf der Mittenachse des inneren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters angeordnet ist.

2. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung mit:
einem ebenen Wellenleiter, der ein offenes Ende hat, durch das Mikrowellenleistung eingeführt wird, und eine Endplatte hat, die gegenüber dem offenen Ende angeordnet ist;
einem zylindrischen coaxialen Wellenleiter, dessen Mittenachse in Richtung eines elektrischen Mikrowellenfeldes angeordnet ist, das innerhalb des ebenen Wellenleiters ausgebildet ist, wobei die Achse mit dem ebenen Wellenleiter um ein Viertel der Wellenlänge der Mikrowellenleistung weg von der Endplatte in Richtung auf das offene Ende des ebenen Wellenleiters gekoppelt ist, wobei das untere Ende eines inneren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters mit einem kreisförmigen Loch an einer unteren Wand des ebenen Wellenleiters gekoppelt ist, wobei das obere Ende des inneren Leiters offen gelassen ist, wobei das untere Ende eines äußeren Leiters des zylindrischen coaxialen Wellenleiters mit einem kreisförmigen Loch an einer oberen Wand des ebenen Wellenleiters gekoppelt ist, wobei das obere Ende des äußeren Leiters durch eine Endplatte mit einem Durchgangsloch in seiner Mitte kurzgeschlossen ist;
einer Entladeröhre, die aus einem elektrisch isolierendem Material gebildet und entlang der Mittenachse des inneren Leiters angeordnet ist, wobei das obere Ende der Röhre offen gelassen ist und aus dem Durchgangsloch der Endplatte vorsteht;
einer Mikrowellenleistung-Zuführeinrichtung zum Zuführen von Mikrowellenleistung in den ebenen

Wellenleiter durch dessen offenes Ende;
einer Plasmagas-Einführeinrichtung zum Einführen von Plasmagas in die Entladeröhre über deren unteres Ende; und
einer Kühleinrichtung zum Kühlen der Entladeröhre.

3. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach Anspruch 2, wobei die Kühleinrichtung weiterhin aufweist:

eine Kammer, die um den Umfang des unteren Endes der Entladeröhre vorgesehen ist;
ein Kühlgas-Einführrohr zum Einführen eines Kühlgases in die Kammer in tangentialer Richtung der Kammer; und

eine Vielzahl von Kühlgas-Abführanschlüssen, die an der äußeren Wand des äußeren Leiters vorgesehen sind;

wobei das in die Kammer eingeführte Kühlgas nach oben durch einen inneren Raum des inneren Leiters entlang der äußeren Fläche der Entladeröhre fließt, bevor das Gas über die Kühlgas-Abführanschlüsse abgegeben wird.

4. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 oder 3 mit einem Mikrowellenausström-Einstellsystem unter der unteren Kante des inneren Leiters, das das untere Ende der Entladeröhre umgibt, wobei das System hinsichtlich der axialen Länge eingestellt wird, um zu gewährleisten, daß der Abstand zwischen dem offenen Ende des inneren Leiters und der Bodenfläche eines leitenden Materials, das das untere Ende der Entladeröhre umgibt, zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung beträgt.

5. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei die axiale Länge des äußeren Leiters zumindest ein Viertel der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenleistung beträgt.

6. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 5, mit einer Abstands-Einstelleinrichtung zum Einstellen des Abstands zwischen dem oberen Ende des inneren Leiters und der Endplatte.

7. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 6, wobei die Endplatte in der Umgebung des Durchgangsloches eine Dicke hat, die geringer ist als die Dicke von ihrem äußeren Abschnitt.

8. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 7, mit einer Abführeinrichtung zum Verringern von Druck innerhalb des inneren Raumes der Entladeröhre.

9. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 8, wobei die Spitze der Entladeröhre in eine Düse geformt ist, deren innerer Durchmesser sich in Richtung auf ihr Ende erweitert.

10. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 9, wobei die Entladeröhre einen coaxialen dualen Röhrenaufbau mit einer inneren und einer äußeren Röhre hat, wobei die innere und die äußere Röhre eine Probe bzw. ein Plasmagas aufnehmen.

11. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 10, mit einer Kühleinrichtung zum Kühlen des oberen Endes der Entladeröhre, wobei die Kühleinrichtung in der Umge-

bung des oberen Endes angebracht ist.

12. Mikrowellen-Plasmaquellenvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 11, mit einer Kühlplatte, die an der äußeren Wandfläche des ebenen Wellenleiters angebracht ist.

5

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

— Leerseite —

FIG. 1A

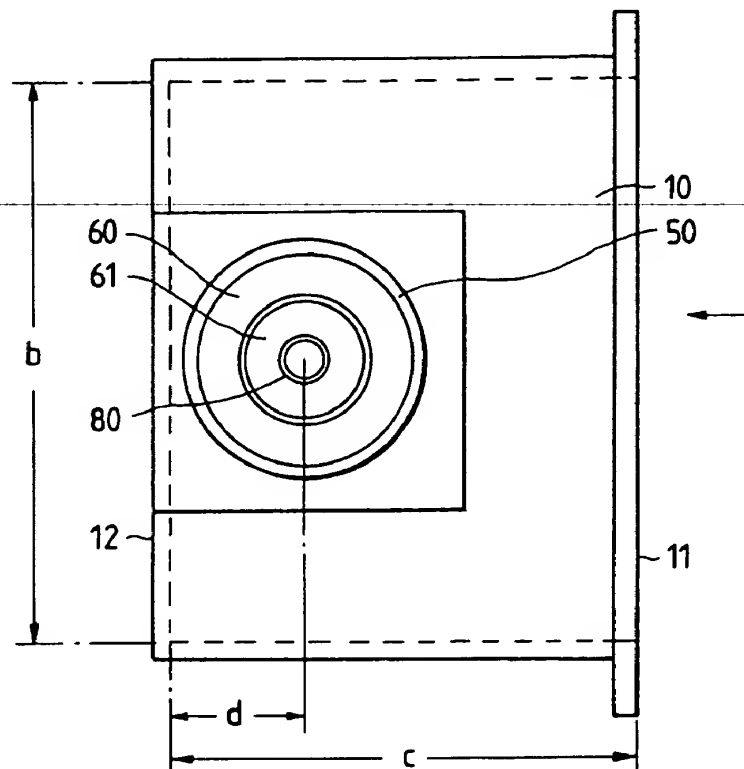


FIG. 1B

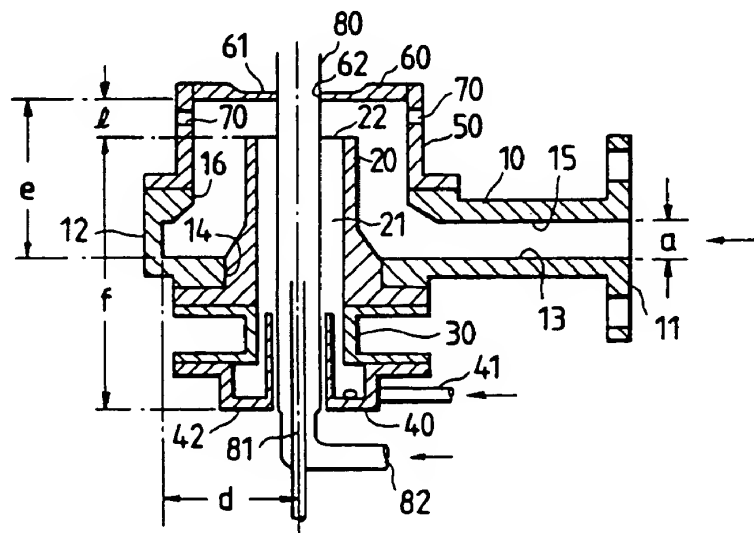


FIG. 2A

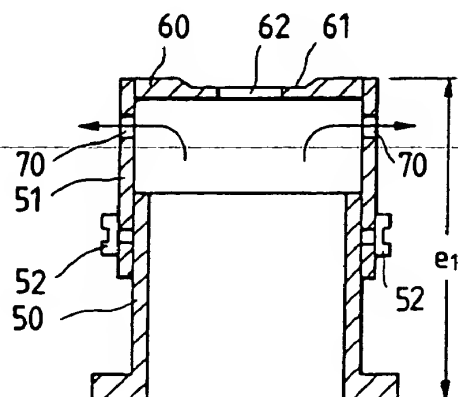


FIG. 2B

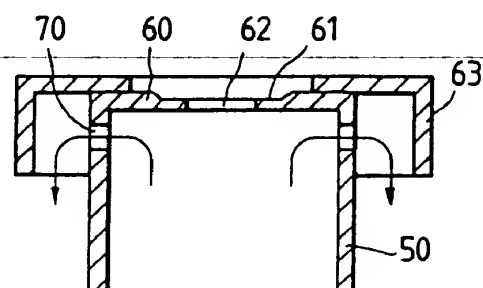


FIG. 3

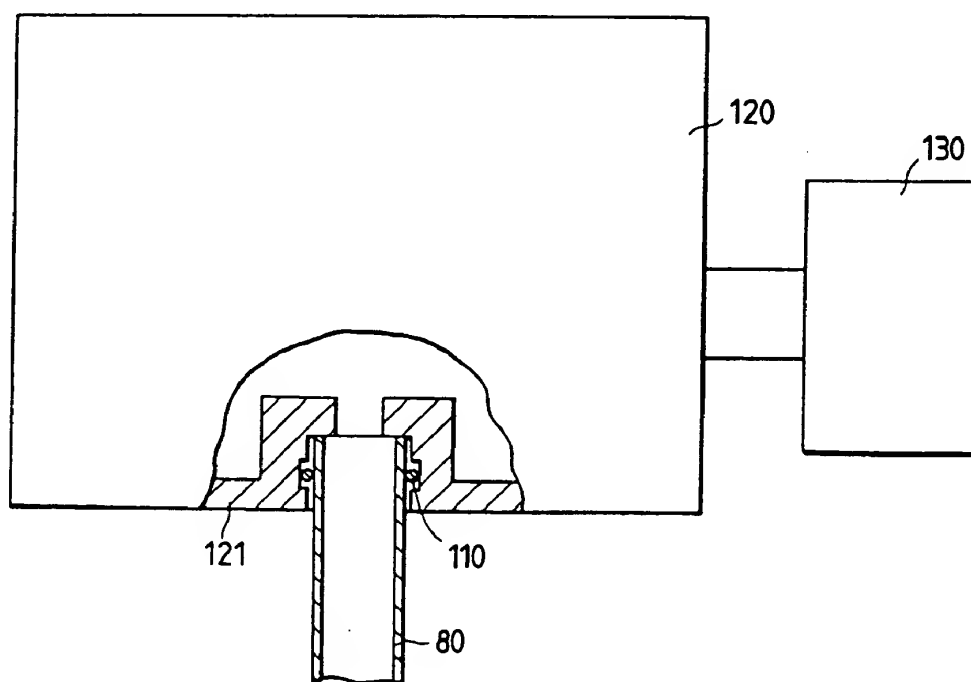


FIG. 4A

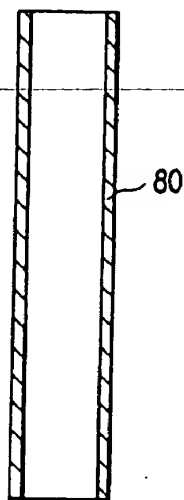


FIG. 4B

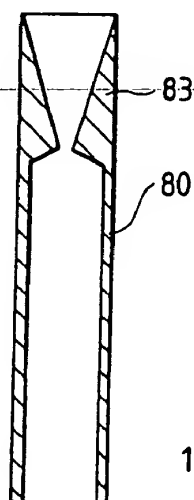


FIG. 4C

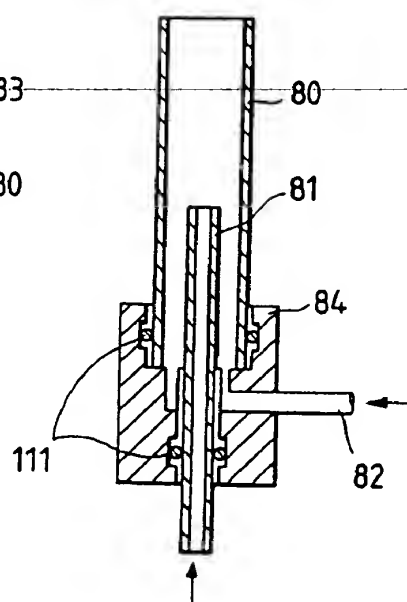


FIG. 5

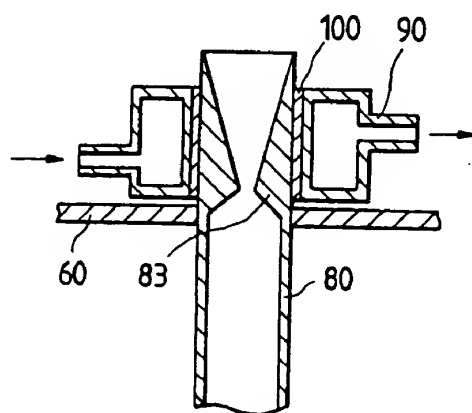


FIG. 6A

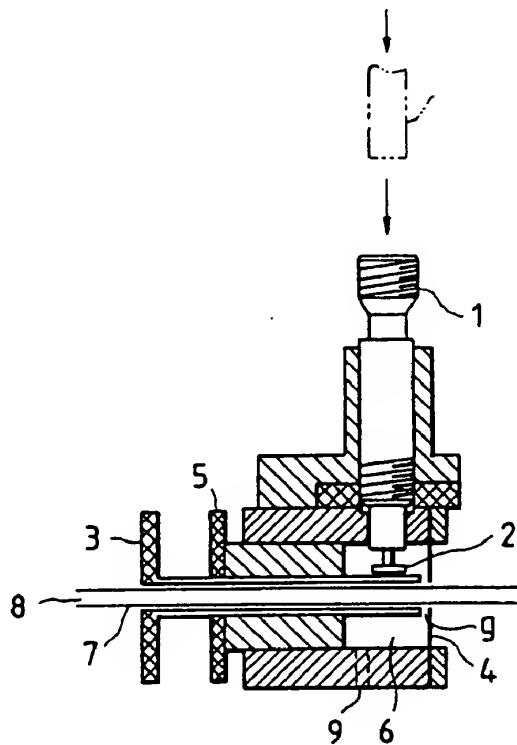


FIG. 6B

